大麦秸秆：康奈尔净碳水化合物与蛋白质体系评定组分及近红外光谱分析技术预测营养价值

李国彰[1,2]　喻笑男[1]　王志兰[1]　马万浩[1]　邓　颖[1]　董春晓[1]　闫佰鹏[1]　兰贵生[1]　李　飞[1*]　李发弟[1,3]　翁秀秀[1]

（1.兰州大学草地农业科技学院，草地农业生态系统国家重点实验室，兰州 730020；2.四川农业大学，动物营养研究所，成都 611130；3.甘肃省肉羊繁育生物技术工程实验室，民勤 733300）

摘　要：本试验旨在基于康奈尔净碳水化合物与蛋白质体系（CNCPS）建立大麦秸秆营养组分数据库，并利用近红外光谱分析技术（NIRS）建立其营养价值预测模型。试验采集甘肃省 13 个县市 96 份大麦秸秆样品，测定其干物质（DM）、粗灰分（Ash）、粗蛋白质（CP）、粗脂肪（EE）、中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）、酸性洗涤木质素（ADL）、中性洗涤不溶蛋白质（NDIP）、酸性洗涤不溶蛋白质（ADIP）、可溶性粗蛋白质（SP）、钙（Ca）和磷（P）含量，利用 CNCPS 6.5 计算各样品碳水化合物（CHO）和蛋白质营养组分。分别用 76 份和 20 份大麦秸秆样品作为定标集和验证集评价 NIRS 预测模型。结果显示：1）大麦秸秆 DM、Ash、CP、EE、NDF、ADF、ADL、NDIP、ADIP、SP、Ca 和 P 含量分别为 95.21%、7.38%、3.51%、5.68%、70.95%、45.16%、5.17%、1.02%、0.57%、1.65%、0.71%和 0.09%。2）大麦秸秆 CNCPS CHO 各组分 CHO、非纤维性碳水化合物（NFC）、可溶性纤维（CB2）、可消化纤维（CB3）和不消化纤维（CC）含量分别为 83.42%、12.47%、12.47%、58.55%和 12.40%。大麦秸秆 CNCPS 蛋白质各组分可溶性真蛋白质（PA2）、难溶性真蛋白质（PB1）、纤维结合蛋白质（PB2）和非降解蛋白质（PC）含量分别为 1.65%、1.23%、0.45%和 0.57%。3）有机物（OM）、CP、NDF、ADF、CHO、NFC 和 CB2 的交互验证决定系数（1-VR）＞0.8，验证决定系数（RSQv）≥0.84，

收稿日期：2017-08-31

基金项目：公益性行业（农业）科研专项-北方农作物秸秆饲用化利用技术研究与示范（201503134）；兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金资助（lzujbky-2017-48）；长江学者和创新团队发展计划资助（IRT13019）

作者简介：李国彰（1988—），男，甘肃酒泉人，硕士研究生，动物营养与饲料科学专业。E-mail: 18919900993@163.com

*通信作者：李　飞，副教授，硕士生导师，E-mail: lfei@lzu.edu.cn

这些模型可用于日常分析。OM、CP、NDF、ADF、CHO、NFC 和 CB2 的模型参数分别为标准正常化和去散射二阶导数处理（SNV and detrend 2,4,4,1）、SNV and detrend 2,4,4,1；标准正常化和去散射一阶导数处理（SNV and detrend 1,4,4,1）；无散射一阶导数处理（None 1,4,4,1）；SNV and detrend 2,4,4,1；无散射二阶导数处理（None 2,4,4,1）；None 2,4,4,1。而其余成分所建模型未达到实用水平，模型须进一步完善。总之，本研究为大麦秸秆在反刍动物饲粮中的应用提供基础的化学分析数据，并通过 NIRS 方法建立了主要营养成分的快速预测模型。

关键词：大麦秸秆；康奈尔净碳水化合物与蛋白质体系；近红外光谱分析技术；营养价值

中图分类号：S816

秸秆资源的高效利用是反刍动物营养学的研究热点之一，我国拥有丰富的大麦秸秆资源，但是几乎没有大麦秸秆营养价值数据库的基础研究。提高大麦秸秆资源综合利用首先要准确评估其营养价值，同时要做到高效和准确的评估。目前，我国在测定和评价反刍动物常用的饲料营养价值的过程中较为普遍的应用了康奈尔净碳水化合物与蛋白质体系（Connell net carbohydrate and protein system,CNCPS）[1-3]，其较概略养分分析体系在反映饲料营养价值方面更为全面，尤其是对粗饲料纤维成分的分析及潜在饲用价值评定尤为重要。近红外光谱分析技术（near infrared reflectance spectroscopy,NIRS）广泛应用于反刍动物粗饲料营养组成的检测过程[4-5]，与传统的化学分析方法相比，NIRS 能够快速、准确地预测饲料中的多个营养参数。本试验基于 CNCPS 分析了大麦秸秆的营养组分，为大麦秸秆的实际生产提供基础数据；此外，利用 NIRS 对大麦秸秆样品中的营养组分分别建立定标模型，并对其进行相应的外部验证，确定模型预测大麦秸秆营养价值的可行性，为生产中快速评估大麦秸秆的营养价值提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集和制备

本试验共采集大麦秸秆样品 96 份，分别来自甘肃省永登县、天祝藏族自治县、景泰县、古浪县、武威市、民勤县、永昌县、金昌市、山丹县、张掖市、民乐县、肃南裕固族自治县和玉

门市等地。样品采集时选取具有代表性、无发霉和无杂草的整株成熟脱籽的大麦秸秆样品 1.5~2.0 kg，采集的大麦秸秆样品符合《饲料卫生标准》。采集大麦秸秆样品的同时制作样品采集信息记录卡（记录内容有秸秆名称、品种名称、采样时间、籽实收获时间、采样地点、采样人等），随样品装入采样袋。

将采集回实验室的整株大麦秸秆样品铡至 3～5 cm，利用粉碎机（切割碾磨仪 SM-2000）粉碎样品，过 40 目饲料分析筛后将样品混合均匀，装入自封袋密封保存及备用。

1.2 大麦秸秆营养组分评定

1.2.1 概略养分分析

干物质（DM）、粗蛋白质（CP）、粗脂肪（EE）、粗灰分（Ash）、淀粉的含量按照文献[6]中方法测定；中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）、酸性洗涤木质素（ADL）、中性洗涤不溶蛋白质（NDIP）、酸性洗涤不溶蛋白质（ADIP）的含量按照 Van Soest 等[7]的方法测定；可溶性粗蛋白质（SP）的含量按照 Krishnamoorthy 等[8]的方法测定；钙（Ca）的含量按照空气-乙炔火焰原子吸收光谱法测定[9]；磷（P）的含量按照钒钼酸铵分光光度法测定[10]。测定的样本重复数为 3。

1.2.2 CNCPS 对营养组分的划分及计算方法

康奈尔大学通过多年科学研究得到预测奶牛瘤胃发酵动态模型，即 CNCPS。该评价体系是建立在瘤胃降解特性基础之上，将饲料中营养物质的化学成分分析与奶牛的瘤胃消化特性进行互相关联，从而对饲料营养价值及奶牛生产性能做出预测。CNCPS 能够对饲料的碳水化合物（CHO）和蛋白质营养价值进行更深层次的评定[7]。

2015 年最新的 CNCPS 版本，CNCPS 6.5 将 CHO 分为 3 部分：CA、CB 和不消化纤维（CC）[11]。CA 包括挥发性脂肪酸（CA1）、乳酸（CA2）、其他有机酸（CA3）和水溶性碳水化合物（CA4），CB 包括淀粉（CB1）、可溶性纤维（CB2）和可消化纤维（CB3）。其中 CA、CB1 和 CB2 为非纤维性碳水化合物（NFC），CC 是 ADL 的 2.4 倍，CB3 和 CC 为纤维性碳水化合物（FC），计

算公式如下：

CHO（%DM）=100-CP（%DM）-EE（%DM）-Ash（%DM）；

NFC（%DM）=CHO（%DM）-NDF（%DM）；

CB2（%DM）=NFC（%DM）-CA1（%DM）-CA2（%DM）-CA3（%DM）-CA4（%DM）-CB1（%DM）；

CB3=NDF（%DM）-CC（%DM）；

CC（%DM）={NDF（%DM）×［ADL（%NDF）×NDF（%DM）］×2.4}/100。

在 CNCPS 6.5 的蛋白质体系中，饲料蛋白质被分为 3 部分：PA、PB 和非降解蛋白质（PC）。PA 包括氨（PA1）和可溶性真蛋白质（PA2），PB 包括难溶性真蛋白质（PB1）、纤维结合蛋白质（PB2）。计算公式如下：

PA1（%DM）=氨（%SP）×［SP（%CP）/100］×［CP（%DM）］/100；

PA2（%DM）=［SP（%CP）×CP（%DM）］/100-PA1（%DM）；

PB1（%DM）=CP（%DM）-PA1（%DM）-PA2（%DM）-PB2（%DM）-PC（%DM）；

PB2=［NDICP（%CP）-ADICP（%CP）］×CP（%DM）/100；

PC=ADICP（%CP）×CP（%DM）/100。

1.3 NIRS 预测模型的建立

1.3.1 NIRS 仪器设备及处理软件

采用的仪器为 DS-2500 近红外光谱分析仪（FOSS，美国），该仪器采集试验样品的数据频率为 2 Hz，光谱分辨率 2 nm，波长准确度小于 0.05 nm。保证样品杯中样品平整且紧实度一致，利用扫描软件 ISIscan Nova 5.5 采集数据，根据 WinISI Ⅲ软件进行模型定标和验证[12-14]。

1.3.2 NIRS 分析方法

大麦秸秆样品经主成分回归（principal component regression，PCR）后，计算马氏距离定标并验证。本试验主要利用 SNV and detrend 和 None 的散射处理结合 PCR 数学处理消除近红外光

谱采集过程中样品自身或外界干扰，减弱光谱图基线漂移或偏移现象的发生，提升光谱精确性及分辨率，从而挑选出相对科学合理的主成分，以便在复杂的分析体系中，可以在不知道干扰成分存在的情况下对被测样品的成分进行有效预测。

1.3.3　NIRS 光谱评价参数

定标集和验证集根据 4∶1 的配比关系[14]，分别选用 76 份和 20 份大麦秸秆样品。根据各个营养成分含量的测定值，选择在其最大值和最小值含量之间的样品进行定标[4]。其各个营养成分的定标评价参数：定标标准差（standard error of validation，SEC）、交互验证标准差（standard error of cross-validation，SECV）和交互验证决定系数（1 minus the variance ratio，1-VR）根据李玉鹏[13]和周军琴[14]方法进行，验证评价参数：验证标准差(standard error of proving，SEP)、验证决定系数(coefficient of determination for validation，RSQv)和平均偏差(Bias)根据李玉鹏[13]、周军琴[14]、Malley[15]和李君霞[16]方法进行，最佳模型确立根据褚小立[17]和李军涛[18]方法。

1.3.4　NIRS 评价参数计算方法

SEC：通过建立的定标模型对定标样品集进行预测，所获得的化学测定值和近红外分析值的标准偏差[17]。

SECV：定标建模过程中，进行交叉验证时所获得的近红外预测值与化学测定值标准偏差，通过 SECV 可以大致评估定标模型的预测准确度[17]。

1-VR：定标建模过程中，进行交叉验证时所得到的相关系数，即模型对样品集浓度变化所能描述出的百分率。如果 1-VR=1,说明在交叉验证过程中，定标样品集浓度的变化被 100%的解释出来[17]。

SEP：其报警限为方程误差 SEC 的 1.3 倍[17]。

RSQv：定标模型对定标样品集变异所能描述出的百分率。如果 RSQv=1,意味着定标集浓度的变化被 100%的解释出来[17]。RSQv 返回 r^2（相关系数 r 的平方），r 的公式如下：

$$r=[\sum(x-\bar{x})-(y-\bar{y})]/\sqrt{(\sum(x-\bar{x})^2\sum(y-\bar{y})^2}$$。

Bias：其报警限为方程定标误差 SEC 的 0.6 倍[17]。

1.4 统计分析

利用 SPSS 16.0 对数据进行描述性统计，并对验证样品的分析值和预测值进行配对 t 检验和回归分析，显著水平为 P＜0.05。

2 结果与分析

2.1 大麦秸秆常规营养成分含量

由表 1 可知，大麦秸秆 DM 含量为 93.63%～97.27%，平均值为 95.21%；Ash 含量为 4.21%～11.57%，平均值为 7.38%；CP 含量为 2.01%～7.83%，平均值为 3.51%；EE 含量为 2.88%～8.34%，平均值为 5.68%；NDF 含量为 58.74%～79.91%，平均值为 70.95%；ADF 含量为 29.85%～54.13%，平均值为 45.16%；ADL 含量为 1.44%～14.10%，平均值为 5.17%；NDIP 含量为 0.61%～1.75%，平均值为 1.02%；ADIP 含量为 0.27%～0.97%，平均值为 0.57%；SP 含量为 0.12%～5.99%，平均值为 1.65%；Ca 含量为 0.57%～0.99%，平均值为 0.71%；P 含量为 0.04%～0.17%，平均值为 0.09%。

表 1 大麦秸秆营养成分（干物质基础）

Table 1 Nutritional components of barley straw （DM basis） %

项目 Items	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准差 SD	变异系数 CV
干物质 DM	95.21	97.27	93.63	0.89	0.01
粗灰分 Ash	7.38	11.57	4.21	1.62	0.22
粗蛋白质 CP	3.51	7.83	2.01	1.00	0.28
粗脂肪 EE	5.68	8.34	2.88	0.82	0.14
中性洗涤纤维 NDF	70.95	79.91	58.74	4.17	0.06
酸性洗涤纤维 ADF	45.16	54.13	29.85	4.07	0.09
酸性洗涤木质素 ADL	5.17	14.10	1.44	2.08	0.40
中性洗涤不溶蛋白质 NDIP	1.02	1.75	0.61	0.19	0.19
酸性洗涤不溶蛋白质 ADIP	0.57	0.97	0.27	0.16	0.28
可溶性粗蛋白质 SP	1.65	5.99	0.12	0.85	0.51
钙 Ca	0.71	0.99	0.57	0.06	0.08
磷 P	0.09	0.17	0.04	0.03	0.30

2.2 大麦秸秆 CNCPS 成分含量

由表 2 可知，大麦秸秆的 CHO 含量在 77.07%～89.79%，平均值为 83.42%；大麦秸秆的 NFC 含量在 5.61%～20.26%，平均值为 12.47%。

大麦秸秆的 CHO 体系中，CB2 含量在 5.61%～20.26%，平均值为 12.47%；CB3 含量在 33.57%～70.36%，平均值为 58.55%；CC 含量在 3.47%～33.84%，平均值为 12.40%。

大麦秸秆的蛋白质体系中，PA2 含量在 0.12%～5.99%，平均值为 1.65%；PB1 含量在 0.19%～2.97%，平均值为 1.23%；PB2 含量在 0.00%～1.20%，平均值为 0.45%；PC 含量在 0.27%～0.97%，平均值为 0.57%。

其余成分 CA1、CA2、CA3、CA4、CB1 和 PA1 测定结果为 0.00%，各个成分结果变异系数均较小。

表 2　大麦秸秆 CNCPS 成分（干物质基础）

Table 2　The CNCPS nutritional components of barley straw （DM basis） %

项目 Items	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准差 SD	变异系数 CV
碳水化合物 CHO	83.42	89.79	77.07	2.53	0.03
非纤维性碳水化合物 NFC	12.47	20.26	5.61	2.86	0.23
挥发性脂肪酸 CA1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
乳酸 CA2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
其他有机酸 CA3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
水溶性碳水化合物 CA4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
淀粉 CB1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
可溶性纤维 CB2	12.47	20.26	5.61	2.86	0.23
可消化纤维 CB3	58.55	70.36	33.57	5.29	0.09
不消化纤维 CC	12.40	33.84	3.47	5.00	0.40
氨 PA1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
可溶性真蛋白质 PA2	1.65	5.99	0.12	0.85	0.51
难溶性真蛋白质 PB1	1.23	2.97	0.19	0.48	0.39
纤维结合蛋白质 PB2	0.45	1.20	0.00	0.23	0.51
非降解蛋白质 PC	0.57	0.97	0.27	0.16	0.28

2.3 大麦秸秆 NIRS 光谱图

本试验所用 96 份大麦秸秆通过 DS-2500 近红外光谱分析仪扫描出其二阶导数处理光谱图，具体如图 1 所示。

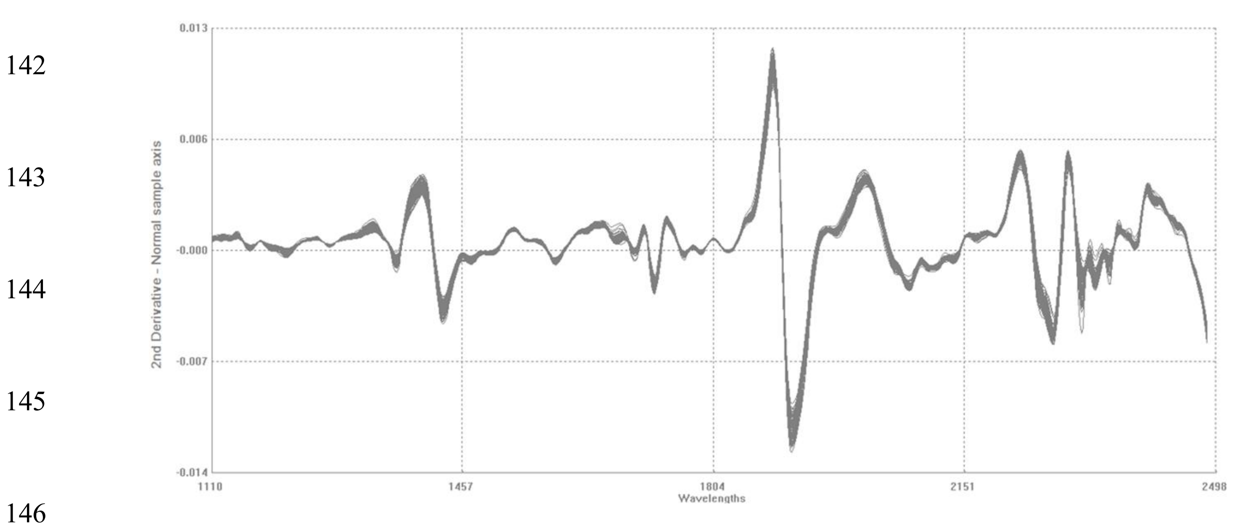


图 1　二阶导数处理 NIRS 光谱图

Fig.1　Second derivative processed NIRS spectrum　（n=96）

2.4　大麦秸秆营养成分 NIRS 模型建立

由表 3 可知，OM 的 SECV 为 0.003 7，1-VR 为 0.952 6；CP 的 SECV 为 0.002 1，1-VR 为 0.944 8；NDF 的 SECV 为 0.010 2，1-VR 为 0.946 8；ADF 的 SECV 为 0.012 8，1-VR 为 0.903 3；CHO 的 SECV 为 0.007 3，1-VR 为 0.920 9；NFC 的 SECV 为 0.010 7，1-VR 为 0.857 1；CB2 的 SECV 为 0.010 7，1-VR 为 0.857 1。其余大麦秸秆的营养成分的 1-VR<0.8，其模型不能用于大麦秸秆样品后续的外部验证。

表 3　大麦秸秆营养成分 NIRS 最优模型参数

Table 3　Parameters of optimal NIRS model of barley straw nutritional components

项目 Items	参数 Parameters	NIRS 模型参数 The parameters of NIRS model		
		定标标准差 SEC	交互验证标准差 SECV	交互验证决定系数 1-VR
干物质 DM	SNV and detrend 2,4,4,1	0.002 7	0.004 7	0.713 2
有机物 OM	SNV and detrend 2,4,4,1	0.002 1	0.003 7	0.952 6
粗蛋白质 CP	SNV and detrend 2,4,4,1	0.001 5	0.002 1	0.944 8

粗脂肪 EE	None 2,4,4,1	0.004 8	0.006 1	0.455 1
中性洗涤纤维 NDF	SNV and detrend 1,4,4,1	0.007 6	0.010 2	0.946 8
酸性洗涤纤维 ADF	None 1,4,4,1	0.010 6	0.012 8	0.903 3
酸性洗涤木质素 ADL	SNV and detrend 1,4,4,1	0.008 2	0.009 3	0.539 6
中性洗涤不溶蛋白质 NDIP	SNV and detrend 1,4,4,1	0.001 0	0.001 3	0.511 1
酸性洗涤不溶蛋白质 ADIP	SNV and detrend 1,4,4,1	0.001 3	0.001 4	0.300 6
可溶性粗蛋白质 SP	SNV and detrend 2,4,4,1	0.003 3	0.004 5	0.538 2
碳水化合物 CHO	SNV and detrend 2,4,4,1	0.004 0	0.007 3	0.920 9
非纤维性碳水化合物 NFC	None 2,4,4,1	0.009 3	0.010 7	0.857 1
可溶性纤维 CB2	None 2,4,4,1	0.009 3	0.010 7	0.857 1
可消化纤维 CB3	SNV and detrend 2,4,4,1	0.018 9	0.025 1	0.456 4
不消化纤维 CC	SNV and detrend 1,4,4,1	0.019 6	0.022 3	0.539 1
可溶性真蛋白质 PA2	SNV and detrend 2,4,4,1	0.003 3	0.004 5	0.538 2
难溶性真蛋白质 PB1	None 2,4,4,1	0.003 4	0.003 7	0.242 9
纤维结合蛋白质 PB2	SNV and detrend 2,4,4,1	0.002 0	0.002 1	0.071 8
非降解蛋白质 PC	None 1,4,4,1	0.001 3	0.001 4	0.304 6

2.5 大麦秸秆营养组分 NIRS 模型外部验证

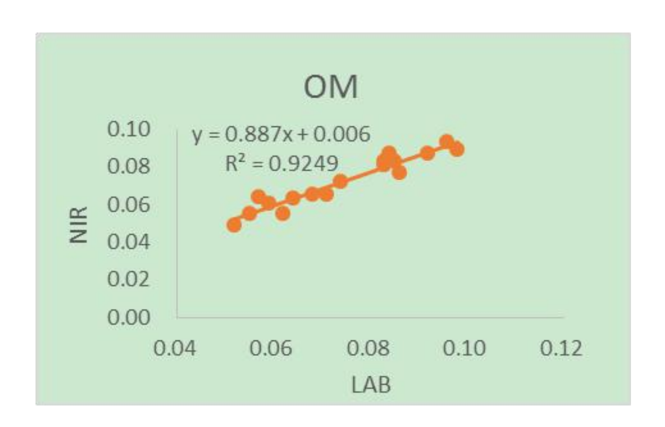
根据 SEP、RSQv 和 Bias，通过之前选出的大麦秸秆的定标集样品对前文所做出最优模型进行最后的外部验证，以评价 NIRS 对大麦秸秆实际预测的效果，从而进一步检验最优模型能否应用于生产实践。由表 4 和图 2~图 8 可知，DM 的 RSQv 为 0.981，OM 的 RSQv 为 0.925，CP 的 RSQv 为 0.920，EE 的 RSQv 为 0.872，NDF 的 RSQv 为 0.868，ADF 的 RSQv 为 0.877，NDIP 的 RSQv 为 0.890，ADIP 的 RSQv 为 0.960，SP 的 RSQv 为 0.865，CHO 的 RSQv 为 0.975，NFC 的 RSQv 为 0.878，CB2 的 RSQv 为 0.878，PA2 的 RSQv 为 0.843，PB2 的 RSQv 为 0.840，PC 的 RSQv 为 0.902。上述营养成分的 RSQv≥0.84，初步认为这些模型可用于日常分析。而其余成分的 RSQv 均<0.84，所以这些营养成分的模型不具备应用于生产实际的条件。

表 4　大麦秸秆营养成分 NIRS 最优模型外部验证参数

Table 4　Parameters of optimal NIRS model of barley straw nutritional components for external validation

项目 Items	验证标准差 SEP	验证决定系数 RSQv	平均偏差 Bias
干物质 DM	0.006	0.981	-0.001
有机物 OM	0.003	0.925	0.001

粗蛋白质 CP	0.003	0.920	0.003
粗脂肪 EE	0.006	0.872	-0.001
中性洗涤纤维 NDF	0.013	0.868	0.003
酸性洗涤纤维 ADF	0.013	0.877	0.004
酸性洗涤木质素 ADL	0.013	0.037	0.006
中性洗涤不溶蛋白质 NDIP	0.001	0.890	0.001
酸性洗涤不溶蛋白质 ADIP	0.001	0.960	0.000
可溶性粗蛋白质 SP	0.004	0.865	-0.003
碳水化合物 CHO	0.008	0.975	-0.000
非纤维性碳水化合物 NFC	0.013	0.878	-0.001
可溶性纤维 CB2	0.013	0.878	-0.001
可消化纤维 CB3	0.024	0.064	-0.005
不消化纤维 CC	0.032	0.228	0.015
可溶性真蛋白质 PA2	0.004	0.843	-0.003
难溶性真蛋白质 PB1	0.004	0.694	0.003
纤维结合蛋白质 PB2	0.002	0.840	0.001
非降解蛋白质 PC	0.001	0.902	0.000



LAB：测定值;NIR：NIRS 预测值。下图同。

LAB： measured value； NIR： predictive value of NIRS. The same as below.

图 2 验证集 OM 的测定值与 NIRS 预测值回归关系（配对 *t* 检验，*n*=17，*P*=0.188）

Fig.2 Regression between measured value of the validation OM and NIRS predictive value (paired *t* test, *n*=17, *P*=0.188)

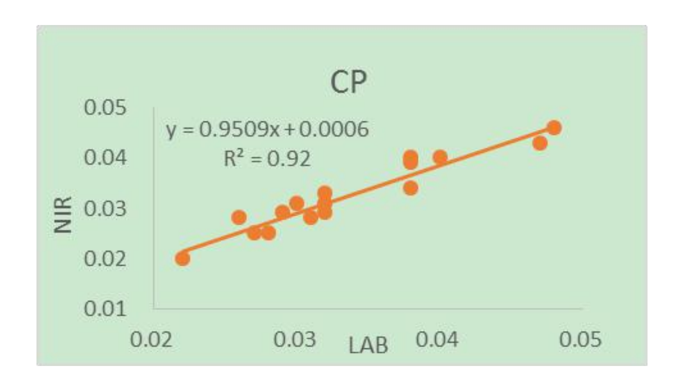


图 3　验证集 CP 的化学值与 NIRS 预测值回归关系（配对 *t* 检验，*n*=16，*P*=0.164）

Fig.3　Regression between measured value of the validation CP and NIRS predictive value (paired *t* test, *n*=16, *P*=0.164)

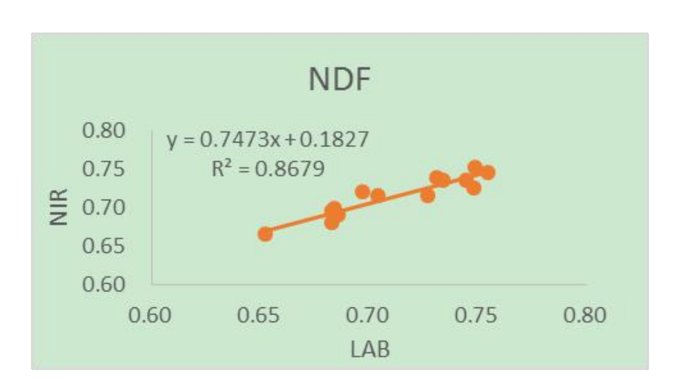


图 4　验证集 NDF 的测定值与 NIRS 预测值回归关系（配对 *t* 检验，*n*=14，*P*=0.205）

Fig.4　Regression between measured value of the validation NDF and NIRS predictive value (paired *t* test, *n*=14, *P*=0.205)

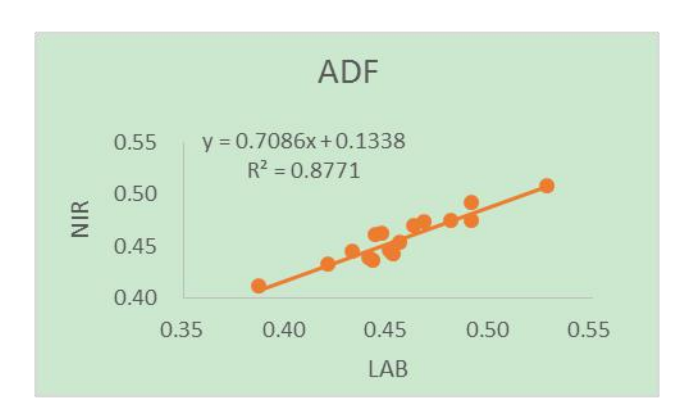


图 5　验证集 ADF 的化学值与 NIRS 预测值回归关系（配对 *t* 检验，*n*=17，*P*=0.548）

Fig.5 Regression between measured value of the validation ADF and NIRS predictive value (paired *t* test, *n*=17, *P*=0.548)

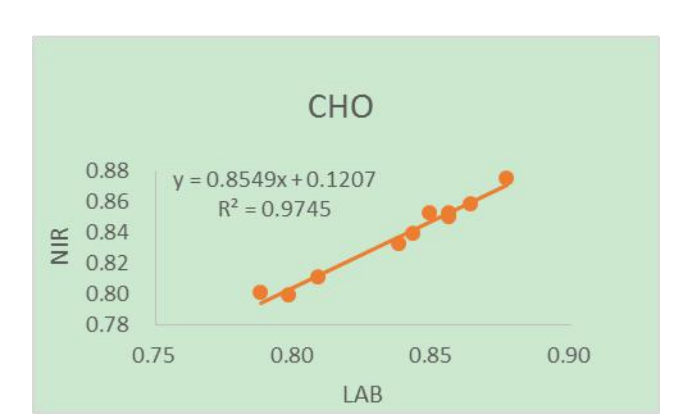


图 6 验证集 CHO 的测定值与 NIRS 预测值回归关系（配对 *t* 检验，*n*=10，*P*=0.343）

Fig.6 Regression between measured value of the validation CHO and NIRS predictive value (paired *t* test, *n*=10, *P*=0.343)

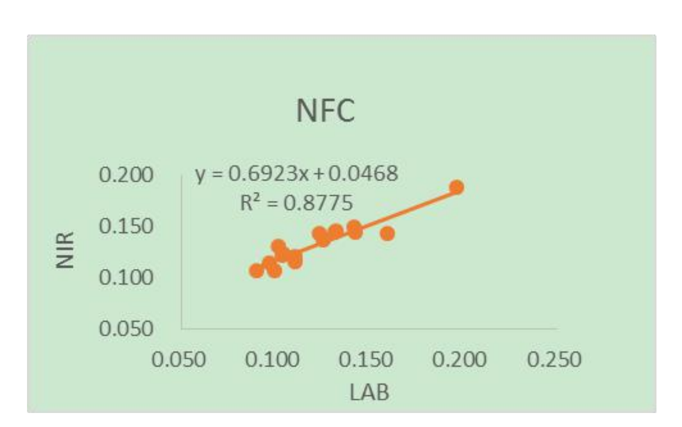


图 7 验证集 NFC 的测定值与 NIRS 预测值回归关系（配对 *t* 检验，*n*=20，*P*=0.095）

Fig.7 Regression between measured value of the validation NFC and NIRS predictive value (paired *t* test, *n*=20, *P*=0.095)

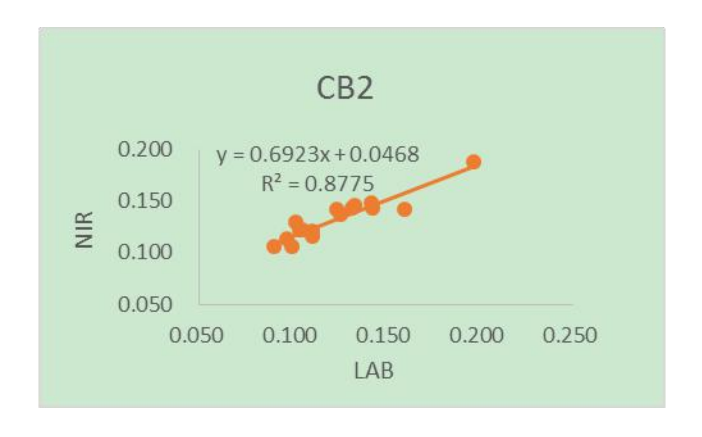


图 8　验证集 CB2 的测定值与 NIRS 预测值回归关系（配对 *t* 检验，*n*=20，*P*=0.095）

Fig.8　Regression between measured value of the validation CB2 and NIRS predictive value (paired *t* test, *n*=20, *P*=0.095)

3　讨　论

3.1　大麦秸秆常规营养成分

大麦秸秆作为反刍动物粗饲料主要来源之一，本试验测得其 DM、Ash、CP、NDF、ADF 和 ADL 的含量分别为 95.21%、7.38%、3.51%、70.95%、45.16%和 5.17%。吕振武等[19]研究西藏的裸大麦秸秆营养成分 DM、Ash、CP、NDF、ADF 和 ADL 的含量分别为 89.57%、8.01%、2.07%、69.85%、49.42%和 8.56%。本研究测定结果与其研究结果相比,Ash、ADF 和 ADL 含量较低，DM、CP 和 NDF 含量较高。

3.2　大麦秸秆 CNCPS 各营养成分特点

本研究中大麦秸秆的 CHO 含量为 83.42%，CB3 含量最高，为 58.55%。CB3 属于植物中可利用的细胞壁，其在反刍动物瘤胃内进行相对缓慢地降解，其在粗饲料如玉米秸秆和禾本科牧草中含量较高[20]。CA1、CA2、CA3、CA4 和 CB1 在大麦秸秆样品中未检测到。

张鹏等[21]研究表明，秸秆中 PC 含有的蛋白质主要与 ADL 互相结合，在反刍动物瘤胃及后消化道均未降解，PC 含量越少，说明大麦秸秆可利用性越高。本研究中大麦秸秆的蛋白质成分 PA1、PA2、PB1、PB2 和 PC 含量分别为 0.00%、1.65%、1.23%、0.45%和 0.57%。大麦秸秆 PC

含量较低，说明大麦秸秆中蛋白质在反刍动物体内的可利用性较高。在蛋白质成分中 PA2 含量较高，这与赵广永[22]及李建云[23]的试验研究报道中所提及的粗饲料可溶性蛋白质主要成分是非蛋白氮的结果相接近。

3.3　NIRS 对大麦秸秆营养成分的预测

国内外科研工作者对粗饲料营养成分的 NIRS 分析已做了大量的研究，一般认为 NIRS 模型需要试验样品的 RSQv≥0.84[12]，且 1-VR>0.8[15]，本试验研究通过 NIRS 成功建立了 OM、CP、NDF 和 ADF 4 种概略养分的模型。然而其余成分的 RSQv 和 1-VR 值分别≤0.84 和<0.8，表明其 NIRS 模型仍需进一步优化。粗饲料概略养分中 CP、CF 和 Ash 的预测模型相对成熟，已有多个报道成功建模。Modron 等[24]利用手提便携式 NIRS 建模获得了较好的 CP 和 CF 含量预测模型，其 1-VR 分别为 0.88~0.90 和 0.85~0.91；Bruno 等[25]研究建立的黑麦草 CP、NDF、ADF 和 Ash 等 NIRS 含量预测模型的验证决定系数均在 0.9 以上；王芳彬[4]利用 125 份西北地区油菜秸秆建立了 DM 和 CP 含量的 NIRS 预测模型，但其余大部分营养成分 NIRS 预测模型结果不理想；Belanche 等[26]选取 80 个不同类型的 660 个饲料样品，在原位降解试验后对这些样品的 DM 和 NDF 通过近红外分析，通过偏最小二乘法对 NDF 完成了准确的测定，但是 DM 的预测精度不准确，这与本试验 NIRS 对于大麦秸秆 DM 和 NDF 的预测结果相一致。

由于关于饲料中 CNCPS 营养成分的 NIRS 预测试验研究报道较少，本试验对大麦秸秆 CNCPS 各营养成分的 NIRS 预测模型进行了较为系统的比较，结果表明 CNCPS 中的 CHO 体系的 CHO、NFC 和 CB2 的 RSQv≥0.84，且 1-VR>0.80，预测模型可用于生产实践。但是，CB3 和 CC 的 RSQv 分别为 0.064 和 0.228，1-VR 分别为 0.456 4 和 0.531 9。大麦秸秆 CNCPS 的 PA2、PB2 和 PC 的模型预测值与测定值的 RSQv 分别为 0.843、0.840 和 0.902，与 Valdes 等[27]研究牧草中 3 种营养成分的值分别为 0.054、0.734 和 0.747 相比，大麦秸秆预测模型精度较好。本试验结果与陈龙等[28]结果相比较好，这可能由于本试验采集的大麦秸秆样品来源地域广阔与采集时期相对一致。

本研究通过概略养分分析法对大麦秸秆营养价值进行初步评定后，利用 CNCPS 体系对其所含 CHO 和蛋白质成分进行详细分析，从而评定其潜在的饲用价值[11]。在实际生产中，可将大麦秸秆营养成分含量导入 CNCPS 配方软件，预测反刍动物生产性能[29]。

4 结 论

① 大麦秸秆 DM、Ash、CP、EE、NDF、ADF、ADL、NDIP、ADIP、SP、Ca 和 P 含量分别为 95.21%、7.38%、3.51%、5.68%、70.95%、45.16%、5.17%、1.02%、0.57%、1.65%、0.71%和 0.09%。

② 大麦秸秆 CNCPS 的营养成分中，CHO、NFC、CB2、CB3、CC、PA2、PB1、PB2 和 PC 含量分别为 83.42%、12.47%、12.47%、58.55%、12.40%、1.65%、1.23%、0.45%和 0.57%。

③ 本试验通过 NIRS 建立了大麦秸秆营养成分含量预测模型，参数如下：OM 为 SNV and detrend 2,4,4,1；CP 为 SNV and detrend 2,4,4,1；NDF 为 SNV and detrend 1, 4, 4, 1；ADF 为 None 1,4,4,1；CHO 为 SNV and detrend 2,4,4,1；NFC 为 None 2,4,4,1；CB2 为 None2,4,4,1；且上述成分的 1-VR>0.8，RSQv≥0.84；在实际生产中可用于快速评定大麦秸秆上述成分的含量。

④ 本研究为大麦秸秆在反刍动物饲粮中的应用提供基础的化学分析数据，并通过 NIRS 方法建立了主要养分的快速预测模型。

参考文献：

[1] 于震.CNCPS 在奶牛日粮评价和生产预测上的应用[D].硕士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2007.

[2] 吴端钦,张爱忠,姜宁,等.用 CNCPS 评定反刍动物几种常用精料营养价值的研究[J].中国牛业科学,2009,35(1):9–12.

[3] 曲永利,吴健豪,张永根.用 CNCPS 体系评定黑龙江省西部地区奶牛饲料营养价值[J].中国畜牧杂志,2009,45(11):42–45.

[4] 王芳彬.基于 CNCPS 和近红外光谱技术评定油菜秸秆营养价值[D].硕士学位论文.兰州:甘肃

农业大学,2016.

[5] 白扎嘎尔.近红外光谱分析技术(NIRS)在反刍动物饲料分析中的应用研究[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

[6] AOAC.Official methods of analysis of AOAC International,16th edition.Volume 1[J].Trends in Food Science and Technology,1995,6(11):382.

[7] SNIFFEN C J,O'CONNOR J D,VAN SOEST P J,et al.A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: Ⅱ. Carbohydrate and protein availability[J].Journal of Animal Science,1992,70(11):3562–3577.

[8] KRISHNAMOORTHY U,SNIFFEN C J,STERN M D,et al.Evaluation of a mathematical model of rumen digestion and an *in vitro* simulation of rumen proteolysis to estimate the rumen-undegraded nitrogen content of feedstuffs[J].British Journal of Nutrition,1983,50(3):555–568.

[9] 徐学笛.空气-乙炔火焰原子吸收光谱法测定头发中钙元素含量的方法及研究[J].化工时刊,2008,22(4):37–39.

[10] 郑丽斯,颜立毅.分光光度计法测定饲料中总磷的不确定度评定[J].农产品加工（学刊）,2012(9):131–135.

[11] VAN AMBURGH M E,COLLAO-SAENZ E A,HIGGS R J,et al.The Cornell net carbohydrate and protein system:updates to the model and evaluation of version 6.5[J].Journal of Dairy Science,2015,98(9):6361–6380.

[12] 李玉鹏,年芳,李爱科,等.近红外反射光谱技术评定棉籽粕营养价值和蛋公鸡代谢能[J].动物营养学报,2016,28(7):2013–2123.

[13] 李玉鹏.近红外反射光谱快速评定棉粕营养价值的研究[D].硕士学位论文.兰州:甘肃农业大学,2016.

[14] 周军琴.基于近红外光谱技术快速检测稻米营养品质和加工精度的研究[D].硕士学位论文.兰州:甘肃农业大学,2016.

[15] MALLEY D F,RÖNICKE H,FINDLAY D L,et al.Feasibility of using near-infrared reflectance spectroscopy for the analysis of C,N,P and diatoms in lake sediments[J].Journal of Paleolimnology,1999,21(3):295–306.

[16] 李君霞,闵顺耕,张洪亮,等.水稻糙米粗蛋白近红外光谱定量分析模型的优化研究[J].光谱学与光谱分析,2006,26(5):833–837.

[17] 褚小立.化学计量学方法与分子光谱分析技术[M].北京:化学工业出版社,2011.

[18] 李军涛.近红外反射光谱快速评定玉米和小麦营养价值的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2014.

[19] 吕振武,王建林.西藏裸大麦秸秆营养价值研究[J].陕西农业科学,1998(2):4–7.

[20] 陶春卫,张爱忠,姜宁,等.用 CNCPS 评定反刍动物几种常用粗饲料营养价值的研究[J].中国草食动物,2009,29(5):14–18.

[21] 张鹏,卜登攀,张养东,等.康奈尔净碳水化合物-净蛋白质体系(CNCPS)在反刍动物上的应用研究[J].中国奶牛,2014(5):7–10.

[22] 赵广永,CHRISTENSEN D A,MCKINNON J J.用净碳水化合物-蛋白质体系评定反刍动物饲料营养价值[J].中国农业大学学报,1999,4(S1):71–76.

[23] 李建云,柴贵宾,朱晓萍,等.辽宁绒山羊常用饲料营养价值评定[J].中国畜牧杂志,2012,48(7):38–42.

[24] MODROÑO S,SOLDADO A,MARTINEZ-FERNÁNDEZ A,et al.Handheld NIRS sensors for routine compound feed quality control:real time analysis and field monitoring[J].Talanta,2017,162:597–603.

[25] BRUNO-SOARES A M,MURRAY I,PATERSON R M,et al.Use of near infrared reflectance

spectroscopy (NIRS)for the prediction of the chemical composition and nutritional attributes of green crop cereals[J].Animal Feed Science and Technology,1998,75(1):15–25.

[26] BELANCHE A,WEISBJERG M R,ALLISON G G,et al.Measurement of rumen dry matter and neutral detergent fiber degradability of feeds by fourier-transform infrared spectroscopy[J].Journal of Dairy Science,2014,97(4):2361–2375.

[27] VALDÉS C,ANDRÉS S,GIRÁLDEZ F J,et al.Potential use of visible and near infrared reflectance spectroscopy for the estimation of nitrogen fractions in forages harvested from permanent meadows[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2006,86(2):308–314.

[28] 陈龙,靳晓霞,冯晋芳,等.近红外光谱法预测燕麦干草蛋白组分的研究[J].中国奶牛,2012(7):11–13.

[29] HIGGS R J,CHASE L E,ROSS D A,et al.Updating the cornell net carbohydrate and protein system feed library and analyzing model sensitivity to feed inputs[J].Journal of Dairy Science,2015,98(9):6340–6360.

Barley Straw：Evaluation of Components in Cornell Net Carbohydrate and Protein System and Nutritional Value **by** Near Infra-Red Spectrum

LI Guozhang[1,2] YU Xiaonan[1] WANG Zhilan[1] MA Wanhao[1] DENG Ying[1] DONG Chunxiao[1]
YAN Baipeng[1] LAN Guisheng[1] LI Fei[1*] LI Fadi[1,3] WENG Xiuxiu[1]

（1. *Key Laboratory of Grassland Farming Systems*, *College of Pastoral Agriculture Science and Technology*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730020, *China*; 3. *Animal Nutrition Institute*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China;* 2. *Mutton Sheep Breeding Biotechnology Engineering Laboratory of Gansu*, *Minqin* 733300, *China*）

Abstract: This study aimed at establishing a database of nutritional value of barley straw based on the

[*]Corresponding author, associate professor, E-mail: lfei@lzu.edu.cn

（责任编辑 王智航）

Cornell net carbohydrate and protein system （CNCPS）, and founding nutritional value prediction models with near infra-red spectrum （NIRS）. A total of 96 barley straw samples were collected from 13 counties and cities in *Gansu* province. Contents of dry matter (DM), crude ash (Ash), crude protein (CP), ether extract (EE), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), acid detergent lignin (ADL), neutral detergent insoluble protein (NDIP), acid detergent insoluble protein (ADIP), soluble protein （SP）, calcium （Ca） and phosphorus （P） were determined. Then the carbohydrate （CHO） and protein components were calculated by CNCPS. NIRS models were evaluated using 76 samples and 20 samples as calibration and validation database, respectively. The results showed as follows: 1) contents of DM, Ash, CP, EE, NDF, ADF, ADL, NDIP, ADIP, SP, Ca and P of barley straw were 95.21%, 7.38%, 3.51%, 5.68%, 70.95%, 45.16%, 5.17%, 1.02%, 0.57%, 1.65%, 0.71% and 0.09%, respectively. 2) Contents of CHO, non fiber carbohydrates (NFC), soluble fiber （CB2）, digestible fiber （CB3） and indigestible fiber （CC） of barley straw of CHO components defined by CNCPS were 83.42%, 12.47%, 12.47%, 58.55% and 12.40%, respectively. Contents of soluble true protein （PA2）, insoluble true protein （PB1）, fiber conjugated protein （PB2） and undegradable protein （PC） of barley of protein components defined by CNCPS were 1.65%, 1.23%, 0.45% and 0.57%, respectively. 3) Cross validation determinant coefficient (1-VR)>0.8, and the verification decision coefficient (RSQv)≥0.84 for the model parameters of OM, CP, NDF, ADF, CHO, NFC and CB2, which suggested that the models can be used for actual analysis. Model parameters of OM, CP, NDF, ADF, CHO, NFC and CB2 were SNV and detrend 2, 4, 4, 1; SNV and detrend 2, 4, 4, 1; SNV and detrend 1, 4, 4, 1; None 1, 4, 4, 1; SNV and detrend 2, 4, 4, 1; None 2, 4, 4, 1; None 2, 4, 4, 1; respectively. Other models did not reach the practical application level. In conclusion, the study provide chemical analysis data for the application of barley straw in diet for ruminants, and establish models for prediction of main nutrients by NIRS.

Key words: barley straw; Cornell net carbohydrate and protein system; near infra-red spectrum; nutritional value